

# MESSEN, VORHERSAGEN, HANDELN



**D**ie 23. Weltklimakonferenz ist in Bonn jüngst zu Ende gegangen – eine weitere wichtige Etappe der Weltgemeinschaft, um die Herausforderungen des globalen Klimawandels zu bewältigen. Den anthropogenen Einfluss auf das Klimasystem, die Störung durch den Menschen, gilt es zu verringern. Die Klima- und Erdsystemforschung liefert dazu Daten – aktuell in außergewöhnlicher Qualität und in nie dagewesenem Volumen. Prof. Dr. Veronika Eyring hat den Vorsitz des CMIP-Panels inne (CMIP – Coupled Model Intercomparison Project), das Klimamodellsimulationen weltweit im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP) koordiniert. Bernadette Jung von der Standortkommunikation des DLR in Oberpfaffenhofen sprach mit ihr.

## Drei Jahrzehnte Atmosphären- forschung im DLR

Die neuen Erdbeobachtungs- und Klimamodelldaten helfen, die wissenschaftlichen Grundlagen zu verbessern und handlungsrelevante Fragen zu beantworten: Wie funktioniert das Klimasystem genau? Was sind die Ursachen für den Klimawandel? Welche Auswirkungen hat er? Und welche Entwicklungen ergeben sich daraus? – Am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre in Oberpfaffenhofen gehen Forscherinnen und Forscher diesen Fragen nach.

Klimadaten in nie dagewesenem Umfang und immer bessere Modelle für eine der größten Aufgaben der Menschheit

### Interview mit DLR-Klimaforscherin Prof. Dr. Veronika Eyring

**Der Bedarf an wissenschaftlichen Informationen und Wissen zum Klimawandel wird immer größer. Welche Rolle spielt dabei die Klimamodellierung?**

■ Vielzählige Einflussfaktoren und gegenseitige Wechselwirkungen machen das Klima zu einem hochkomplexen System. Klimamodelle sind numerische Werkzeuge, die diese Wechselwirkungen und Rückkopplungen simulieren. Sie sind ein wichtiges Instrument, um das vergangene und heutige Klima zu verstehen und Vorhersagen der Entwicklung des zukünftigen Klimas zu liefern. Mit dem gestiegenen Informationsbedarf sind auch die Anforderungen an die Modellierungen gewachsen. Moderne Erdsystemmodelle können bereits eine Vielzahl von Faktoren berücksichtigen, von der vollständigen Atmosphärenchemie über dynamische Prozesse der Landoberfläche einschließlich der Vegetation bis zu Kohlenstoffzyklen an Land und im Meer. Die horizontale und vertikale Auflösung der Modelle steigt ebenso. In meiner Arbeitsgruppe „Erdsystemmodellevaluierung“ erforschen wir die Qualität der verschiedensten Modelle im Vergleich zu Beobachtungsdaten. So kommen wir zu einem besseren Prozessverständnis des Klimasystems und können Empfehlungen für Modellweiterentwicklungen geben. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für zuverlässige Klimaprognosen, die von Gesellschaft, Politik und Industrie dringend benötigt werden.



Wie sich Wolken in sauberer Luft über Urwald von denen in entwaldeten verschmutzten Regionen unterscheiden, untersucht das Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft). Hier eine Aufnahme aus dem Cockpit über den Nasenmast vor einem sich auflösenden Gewitter über dem Amazonasgebiet.

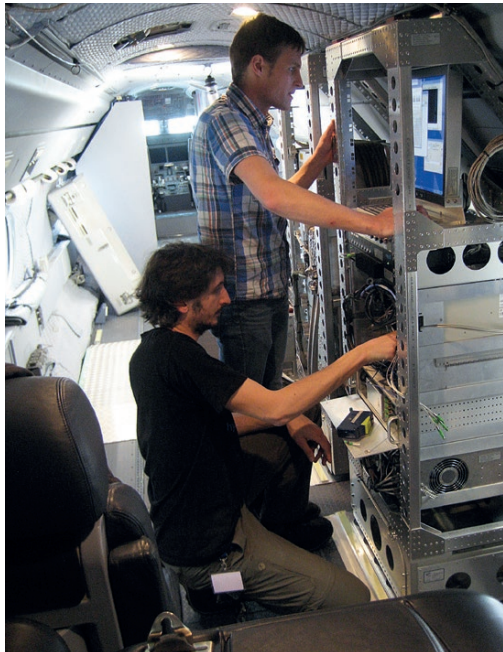
### Wie werden diese Forschungsergebnisse genutzt?

■ Unter der Schirmherrschaft des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP) arbeiten hunderte von Klimaforschern in Modellierungszentren rund um die Welt daran, die neuesten Ergebnisse globaler Klimamodelle auszutauschen, zu vergleichen und zu analysieren. Im Rahmen des Projekts CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) liefern Simulationen der Forschungsgemeinschaft wichtige Daten für die nächsten fünf bis zehn Jahre. Der Weltklimarat nutzt die CMIP-Klimamodellsimulationen als eine wesentliche Quelle für seine Sachstandsberichte – wie auch in seinem letzten vollständigen Bericht von 2013, der die wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage für das Paris-Abkommen war und zur Verabschiedung des Zwei-Grad-Klimaziels führte. Das bestärkt uns in der Abteilung Erdsystemmodellierung darin, auch für den nächsten Sachstandsbericht 6 einen signifikanten Beitrag zu leisten. Zum einen tragen wir mit Klimasimulationen mit dem Modell EMAC (ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry) zum Projekt CMIP6 bei und zum anderen entwickeln wir das Erdsystemmodellevaluierungstool (ESMValTool) weiter und wenden es auf CMIP6-Simulationen an. Das ermöglicht es, die Modelle routinemäßig anhand von Beobachtungsdaten zu überprüfen.

### Komplexere Klimamodelle, präzisere Prognosen – wo liegen die nächsten Herausforderungen?

■ Das betrifft auch das Thema Big Data. Dank der rasanten wissenschaftlichen und technologischen Fortschritte erreichen unsere Datensätze völlig neue Dimensionen. Das ist eine gute Nachricht, fordert jedoch die Kapazität und Kreativität der größten Rechenzentren und schnellsten Datennetze heraus. Allein für die aktuelle Projektphase von CMIP erwarten wir ein Datenvolumen von 20 bis 40 Petabyte – ein Zuwachs um den Faktor zehn bis 20 im Vergleich zum Modellarchiv CMIP5 von 2013. In den kommenden Jahren werden über 30 internationale Klimamodellierungsgruppen neue CMIP6-Modelldaten liefern. Diese Daten müssen archiviert, dokumentiert, verteilt und analysiert werden. Hinzu kommt die Verarbeitung und Bereitstellung von Erdbeobachtungsdaten aus dem Satelliten-Programm Copernicus der Europäischen Union und anderen Satellitenmissionen sowie von Flugzeug-Messkampagnen und Bodenstationen. In Oberpfaffenhofen sind wir daher schon länger in dem Bereich aktiv und haben unter anderem das ESMValTool entwickelt – ein Werkzeug zur effizienten Evaluierung der Modelle mit Beobachtungsdaten, das auch bei CMIP6 routinemäßig am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) zum Einsatz kommt.





Vorbereitung zu einem Testflug für die deutsch-französische Klimamission MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission) mit HALO. Auf der Mission soll CHARM-F zum Einsatz kommen. CHARM-F ( $\text{CH}_4$  Airborne Remote Monitoring) ist ein flugzeuggetragenes „integrated path differential absorption“ (IPDA)-Lidar. Mit ihm lassen sich Gradienten der Konzentration sowie Boden-Atmosphären-Flüsse von Kohlendioxid und Methan quantifizieren, und das sowohl über anthropogenen Punktquellen als auch über ausgedehnten natürlichen Quellen.

### Sie sind auch am Aufbau des neuen DLR-Instituts für Datenwissenschaften in Jena beteiligt?

■ Ja, ich unterstütze dort den Aufbau einer Gruppe zur Klimainformatik, die in Kooperation mit unserem Institut, mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena und mit dem Max-Planck-Institut für Biogeochemie tätig sein wird. Unser Ziel ist es, innovative und effiziente Methoden zum Datenmanagement und zur Datenanalyse zu entwickeln. Die Klimainformatik ist ein spannendes neues Forschungsfeld, um Erdsystemdaten von Modellen und Satelliten auf eine neue Ebene zu heben. Wenn wir das ESMValTool mit geeigneten Data-Science-Methoden erweitern, können wir neue Wege finden, um Änderungen im Klimasystem frühzeitig zu erkennen. Auch bisherige Unsicherheiten in den Projektionen von Klimamodellen möchten wir mit Informatikanwendungen und den Forschungen an unserem Institut weiter reduzieren.

### In der Klimadiskussion gibt es auch Stimmen, die den anthropogenen Klimawandel leugnen. Welche Antworten liefern Klimamodelle darauf?

■ Um den Einfluss der Menschen auf das Klima von anderen, natürlich gegebenen Faktoren zu unterscheiden, lassen sich „Sensitivitätssimulationen“ heranziehen. Dabei werden Modellsimulationen, die

nur die natürlichen Klimaantriebe berücksichtigen, verglichen mit solchen, die sowohl natürliche als auch anthropogene Antriebe berücksichtigen. Der eben erwähnte fünfte Sachstandsbericht des Weltklimarats kam dabei zu dem Schluss, dass der menschliche Einfluss auf das Klimasystem klar ist. Wissenschaftlich belastbare Daten zeigen unsere Klimawirkung in den ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre und im positiven Strahlungsantrieb. Hinzu kommen die Beobachtungen der Erderwärmung und anderer Klimaindikatoren sowie unser zunehmend genaueres Verständnis des Klimasystems.

### Die Bestimmung des Treibhauseffekts ist für Klimaprojektionen entscheidend. Woher beziehen Sie die notwendigen Daten?

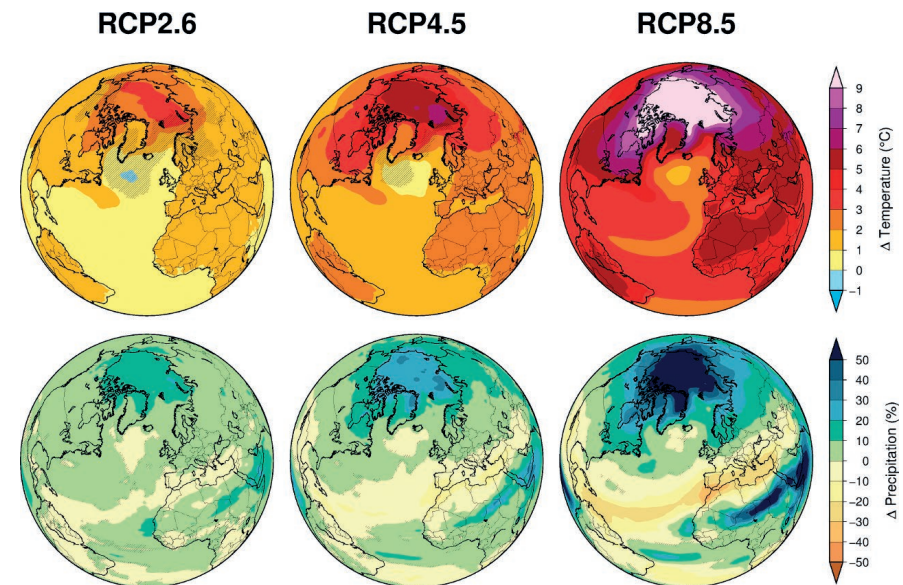
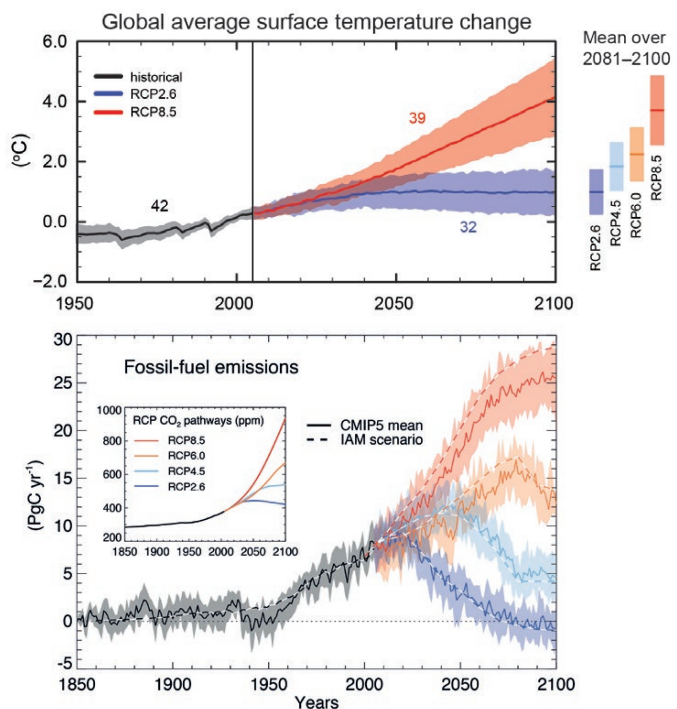
■ Wir benötigen für die Evaluierung der Modelle vor allem Langzeitmessungen, wie sie zum Beispiel vom DLR Earth Observation Center (EOC) und dem ESA-Programm „Climate Change Initiative“ (CCI) geliefert werden. Der Ausstoß der beiden wichtigsten Treibhausgase, Kohlendioxid und Methan, lässt sich in-situ, also direkt vor Ort in der Atmosphäre, oder mit Hilfe von Satelliten messen. Einen Durchbruch im Verständnis und bei der Analyse regionaler Methan-Emissionen erwarten wir in den kommenden Jahren, wenn 2020 die deutsch-französische Satellitenmission MERLIN starten wird. Zur Vorberei-

Auf der Pariser Klimaschutzkonferenz im Dezember 2015 haben sich 195 Länder erstmals auf ein allgemeines, völkerrechtlich verbindliches weltweites Klimaschutzübereinkommen geeinigt. Das Übereinkommen umfasst einen globalen Aktionsplan, der die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius begrenzen soll, um einem gefährlichen Klimawandel entgegenzuwirken. Dazu müssen insbesondere die Emissionen von Treibhausgasen so schnell wie möglich deutlich reduziert und in den folgenden Jahrzehnten auf Null zurückgefahren werden.

Diagramm oben:  
Aktuelle Ergebnisse des Weltklimarats IPCC zur zukünftigen Entwicklung der globalen Oberflächentemperatur, abhängig von verschiedenen Emissionsszenarien (Representative Concentration Pathways, RCP). Dabei entspricht die blaue Kurve dem Zwei-Grad-Ziel, während die rote Kurve ein „Business as usual“, also ein „Weiter-so-Szenario“ darstellt.

Diagramm unten:  
RCP und zugehörige atmosphärische Kohlendioxid-Konzentrationen (Inlays). Hervorzuheben ist, dass das Szenario RCP2.6, das dem Zwei-Grad-Ziel entspricht, in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts negative Emissionen erfordert, das heißt: Der Atmosphäre muss Netto-Kohlendioxid entzogen werden.

Quelle: IPCC 2013, AR5, Fig. SPM 7 und Fig. TS19



Klimamodellierung: Die drei Klimaszenarien zeigen den angenommenen Ausstoß von Treibhausgasen. Die Ausstoßmenge nimmt von RCP2.6 (Representative Concentration Pathways, RCP) nach RCP8.5 jeweils zu.

Die obere Zeile zeigt Änderungen der Zwei-Meter-Temperatur, wie sie für Ende des 21. Jahrhunderts (gemittelt über die Jahre 2090 bis 2099) im Vergleich zum Zeitraum 1986 bis 2005 berechnet wurden. In der unteren Zeile sind die dazugehörigen relativen Änderungen des Niederschlags gezeigt. Alle diese Ergebnisse sind Mittelwerte über insgesamt 26 verschiedene Klimamodelle der „CMIP5-Generation“, sogenannte „multi-model means“.

(Abbildung erzeugt mit ESMValTool, <http://www.esmvaltool.org/>).

tung dieser Mission wird von unserem Institut derzeit der MERLIN-Flugzeugdemonstrator „CHARM-F“ an Bord des Forschungsflugzeugs HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) im Rahmen von Messkampagnen eingesetzt. Dabei vermessen wir gezielt anthropogene und auch natürlich Methan- und Kohlendioxidquellen. Mit MERLIN werden wir dann aus 500 Kilometer Höhe einen globalen Datensatz erheben und unter anderem Methan-Emissionen überwachen, die aufgrund der Erderwärmung von Permafrostböden oder Ozeansedimenten freigesetzt werden.

### Das Zwei-Grad-Ziel der Weltklimakonferenz von Paris ist eine große Herausforderung. Kann die Klimaforschung des DLR Deutschland bei der Umsetzung unterstützen?

■ Die Herausforderung für uns liegt darin, maximal wirksame Klimaschutzmaßnahmen bei minimaler Belastung der Wettbewerbsfähigkeit der Volkswirtschaft zu erreichen. In den entscheidenden Forschungsfeldern leistet das DLR bereits seit vielen Jahren signifikante Beiträge. Technologische Lösungen zur Vermeidung von Treibhausgasen bedeuten den Umbau des Energiesektors, der Industrie sowie des Luftfahrt- und Verkehrssektors. Da entsprechende Maßnahmen weitreichende volkswirtschaftliche Folgen haben werden, müssen sie zuvor nach bestem Stand der Wissenschaft und Technik evaluiert werden. Dies setzt ein tiefes Verständnis des Systems Erde voraus, insbesondere in Bezug auf seine Kohlenstoff- und Energieprozesse. Die naturwissenschaftlichen Grundlagen und Analyseverfahren werden durch unser Institut und die internationale Forschungsgemeinschaft stetig erweitert. Mit Satellitenmissionen wie MERLIN oder Tandem-L ist das DLR in der Lage, globale Klima- und Umweltbeobachtungssysteme für morgen aufzubauen. Solche Beobachtungssysteme sind unverzichtbar, wenn es darum geht, die Wirksamkeit und die Einhaltung von Klimaschutzmaßnahmen zu verifizieren. Darüber hinaus müssen natürlich auch die weiteren ökonomischen und sozialen Folgen von geplanten Maßnahmen betrachtet werden. Zusätzlich untersucht unser Institut die Klimawirkung von Verkehrs- und Luftverkehrsemissionen inklusive der klimatischen Effekte, die nicht auf den Kohlendioxidausstoß zurückzuführen sind (beispielsweise Kondensstreifen, Zirren oder Ozon), und arbeitet an Flugroutenoptimierungen. Die sich hieraus ergebende Kosten-Nutzen-Analyse wird mit alternativen Konzepten aus dem Bereich Design und Flugführung verglichen, um Reduktionspotenziale für die Klimawirkung des Luftverkehrs zu finden.



**Professor Dr. Veronika Eyring ...**  
... leitet die Forschungsgruppe Erdsystemmodellevaluierung am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre in Oberpfaffenhofen und ist Professorin für Klimamodellierung am Institut für Umweltphysik an der Universität Bremen. Seit 2014 hat sie den Vorsitz des CMIP-Panels inne, ein Projekt des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP), das weltweit Klimamodellsimulationen koordiniert. Am neuen DLR-Institut für Datenwissenschaften in Jena unterstützt Veronika Eyring aktuell den Aufbau einer Arbeitsgruppe zum Thema Klimainformatik.

### CMIP – Coupled Model Intercomparison Project

CMIP startete vor 20 Jahren als Forscherinitiative, um die ersten globalen Klimamodelle miteinander zu vergleichen. Heute bündeln weltweit mehrere hundert Wissenschaftler ihre Expertise. Ziel von CMIP ist es, die vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Klimaveränderungen besser zu verstehen. Um Modellergebnisse vergleichen zu können, erarbeitet CMIP unter anderem Standards für Simulationen, Datenformate und Auswertalgorithmen. Dadurch bekommen die Klimaforscher die Möglichkeit, ihre Erkenntnisse unmittelbar untereinander zu teilen, zu vergleichen und zu bewerten. Die Datenprodukte von CMIP stellen damit eine der wichtigsten Quellen für robuste und zuverlässige Klimainformationen dar.